روشی دقیق برای تعیین فاصله خطا در خطوط انتقال چند پایانه‌ای مبتنی بر امواج سیار و الگوریتم ژنتیک

مهدی قاضی‌زاده احسائی[1]

۱- استادیار- گروه مهندسی برق- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه زابل - زابل- ایران

ghazizadeh@uoz.ac.ir

چکیده: در این مقاله، روش جدیدی برای تعیین دقیق فاصله‌ی خطا در خطوط انتقال دارای چند پایانه ارائه شده است. این روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک بوده و از اطلاعات همزمان ثبت شده در پایانه ها استفاده می نماید و دارای دو مرحله می‌باشد. در مرحله اول، با استفاده از روش مقایسه‌ایِ ارائه شده بخشی از خط انتقال که دچار خطا شده تعیین می‌شود. در مرحله دوم، نیز فاصله دقیق خطا با بکارگیری الگوریتم ژنتیک مشخص می‌گردد. این روش دارای دقت بالایی نسبت به روش‌های قبلی که برای خطوط انتقال چند پایانه‌ای ارائه شده، می‌باشد زیرا از مدل گسترده‌ی خط در حوزه زمان که ظرفیت خازنی خط را نیز بطور کامل مدل سازی می کند استفاده می‌نماید و به دلیل بهره‌گیری از نمونه‌های ثبت شده در پایانه‌ها، هامونیکهای موجود در شکل موج پایانه‌ها بر عملکرد آن تاثیری ندارد. نتایج شبیه‌سازی دقت بالای روش پیشنهادی را در مقایسه با روش‌های قبلی در شرایط مختلف خطا نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: خطوط انتقال چند پایانه‌ای، مدل گسترده خط، اطلاعات همزمان، فاصله‌یابی خطا، حفاظت خط انتقال.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۰۸/۰۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۵

نام نویسنده‌ی مسئول: مهدی قاضی‌زاده احسائی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – زابل – کیلومتر ۳ جاده بنجار – پردیس جدید دانشگاه زابل – دانشکده‌ی فنی و مهندسی – گروه مهندسی برق

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.8.3]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol14 No.3 Fall2017

۱- مقدمه

حفاظت و مکان یابی خطا در شبکه های قدرت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و توجه محققان و پژوهشگران زیادی را به خود جلب کرده است [۲۵-۱].

با توسعه‌ی سیستم‌های قدرت مدرن، شبکه‌های قدرت پیچیده تر شده‌اند و خطوط انتقال چند پایانه‌ای نیز در سیستم‌های قدرت بوجود آمده‌اند. این خطوط خطاهای مختلفی را تجربه می‌کنند که می‌تواند ناشی از عوامل خارجی یا داخلی باشد. برای تداوم سرویس دهی و افزایش قابلیت اطمینان شبکه، به روش‌های مکان‌یابی خطای دقیقی احتیاج می‌باشد. اما، مکان‌یابی خطا در چنین خطوطی از پیچیدگی بیشتری نسبت به خطوط معمولی برخوردار است. از طرفی، روش‌های مکان‌یابی خطای تک پایانه‌ای [۸-۴] و دو پایانه‌ای [۱۳-۹] قادر به تعیین بخش خطا دیده از خط انتقال چند پایانه‌ای نیستند و روش‌های معدودی برای مکان‌یابی خطا در این نوع خطوط ارائه شده است [۲۳-۱۴]. این روش‌های چند پایانه‌ای از مقاومت خطا و امپدانس تونن سیستمهای خارجی تاثیر کمتری می‌پذیرند و از لحاظ تئوری دقیق ترند. در ضمن، تکنولوژی مخابراتی موجود استفاده از اطلاعات نمونه‌گیری شده در چند پایانه خط را فراهم می‌آورد. مرجع [۱۴] از اطلاعات ولتاژ و جریان همه‌ی پایانه‌ها بصورت همزمان استفاده می نماید. این مرجع بخش خطادار را تعیین نموده و سپس، با استفاده از روشی مبتنی بر توان راکتیو مکان خطا را پیدا می‌کند. مرجع [۱۵] از تفاضل جریان پایانه‌ها برای مکان‌یابی خطا استفاده می‌نماید. در مرجع [۱۶]، از جریان‌های همزمان که از پایانه‌ها وارد می‌شود استفاده شده و از دو روش متفاوت برای تعیین مکان خطا بهره‌گیری شده است. روش ارائه شده در [۱۸] بر اساس یک الگوریتم دو پایانه‌ای مکان خطا را تعیین می نماید و از اطلاعات همزمان پایانه‌ها بهره برده است. روش‌های پیشنهادی در [۲۰-۱۹] با محاسبه فاصله زمانی بین امواج رفت و برگشتی از محل خطا، مکان خطا را تعیین می‌نمایند که نیاز به فرکانس نمونه برداری بالا دارند و دقت این روش‌ها به فرکانس نمونه‌برداری وابسته است. از طرفی، برای خطاهایی که نزدیک پایانه ها و یا گره‌ها اتفاق می افتد درصد خطای مکان یابی به شدت افزایش می یابد [۱۹]. مرجع [۲۱] روش مناسبی ارائه داده است که تنها از ولتاژهای اندازه گیری شده در ترمینالهای خط استفاده می‌کند. اما، بایستی حتما امپدانس معادل تونن پایانه‌های خط مشخص باشد. البته، در روش ارائه شده در مرجع [۲۲]، نیز امپدانس معادل تونن پایانه‌ها بایستی معلوم باشد. در مرجع [۲۳]، روشی ارائه شده که دارای بار محاسباتی کمی است و به امپدانس معادل تونن پایانه‌ها وابستگی ندارد. اما، از مدل فشرده خط بهره برده است که برای مکان‌یابی خطا در خطوط بلند از دقت کافی برخوردار نیست.

در این مقاله، روشی برای تعیین دقیق محل خطا در خطوط انتقال چند پایانه‌ای بر مبنای الگوریتم ژنتیک ارائه شده است که برخلاف برخی از روش‌های قبلی نیاز به امپدانسِ معادلِ تونن پایانه‌هایِ خط ندارد. همچنین، به دلیل استفاده از مدل گسترده‌ی خط انتقال در حوزه زمان که خاصیت خازنی خط را بطور کامل مدل‌سازی می‌کند، دارای دقت بالاتری نسبت به روش‌های قبلی می‌باشد. از طرفی، برای سرعت بیشتر در حل مساله بهینه سازی بدست آمده برای مکان‌یابی خطا از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. حداکثر قدر مطلقِ خطایِ روش پیشنهادی به ۰/۰۵ درصد محدود می‌گردد، در حالی که روش‌های ارائه شده‌ی قبلی دارای خطای بالاتری نسبت به روش ارائه شده در این مقاله می‌باشند.

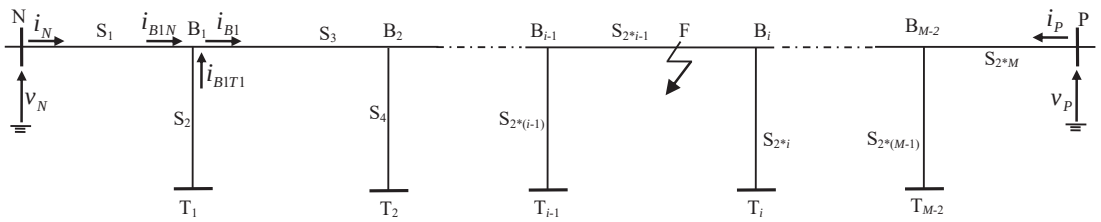
در ادامه در بخش ۲- به روش پیشنهادی مکان‌یابی خطا پرداخته شده است. در این قسمت روش ارائه شده در دو مرحله آورده شده است. در زیر بخش ۲-۱- روش پیشنهادی برای خطوط تک‌فاز توضیح داده شده و در زیر بخش ۲-۲- برای خطوط سه‌فاز شرح داده شده است. در بخش ۳- نیز روش ارائه شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. در بخش ۴- نیز نتیجه گیری انجام شده است.

۲- روش پیشنهادی مکان‌یابی خطا

برای سادگی، ابتدا روش پیشنهادی برای خط انتقال چند پایانه‌ایِ تک فاز ارائه می‌شود. سپس، این روش به خط انتقال سه فاز قابل تعمیم می‌باشد.

۲-۱- خط انتقال چند پایانه‌ای تک‌فاز

یک سیستم انتقال دارای M پایانه و تک فاز را در نظر بگیرید (شکل (۱)) که خطایی در آن اتفاق افتاده است. فرض کنید ولتاژها و جریان‌های تمامی پایانه‌ها ثبت شده و بصورت همزمان در اختیار می



شکل (۱): دیاگرام سیستم انتقال چند پایانه‌ای

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.8.3]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.3 Fall 2017

باشد.

روش پیشنهادی مکان‌یابی از دو مرحله تشکیل شده است. در مرحله اول بخش خطادار از خط مشخص می‌گردد و در مرحله دوم فاصله‌ی خطا تعیین می‌شود. روش پیشنهادی در ادامه آورده شده است.

۲-۱-۱- مرحله اول: تعیین بخش خطادار

برای تعیین بخش خطادار ولتاژهای تمامی گره‌ها با استفاده از ولتاژها و جریان‌های پایانه‌ها محاسبه می‌شود. با مقایسه ولتاژهای محاسبه شده در گره‌های مختلف، بخش خطادار مشخص می‌شود. در این روش، از باس N شروع کرده و ولتاژ گره B_1 با استفاده از ولتاژ و جریان پایانه N بدست می‌آید [۲۴]:

$$\begin{aligned} v_{B1N}(t) = & ((Z_c + R_{S1}/4)^2.[v_N(t+\tau_{S1}) \\ & -(Z_c + R_{S1}/4).i_N(t+\tau_{S1})] \\ & +(Z_c - R_{S1}/4)^2.[v_N(t-\tau_{S1}) \\ & +(Z_c - R_{S1}/4).i_N(t-\tau_{S1})] \\ & -\frac{(Z_c + R_{S1}/4)}{4}.[\frac{R_{S1}/2}{(Z_c + R_{S1}/4)}.v_N(t) \\ & +2.(Z_c - R_{S1}/4).i_N(t)])/2Z_c^2 \end{aligned} \quad (۱)$$

که:

v_{B1N}: ولتاژ محاسبه شده برای گره B_1 با استفاده از ولتاژ و جریان پایانه N،

v_N،i_N: به ترتیب ولتاژ و جریان پایانه N،

τ_{S1}: زمان مورد نیاز برای موج سیار برای طی مسیر از گره N تا B_1،

Z_c: امپدانس مشخصه،

R_{S1}: مقاومت خط مربوط به بخش S_1.

همچنین، ولتاژ گره B_1 را می‌توان با استفاده از ولتاژ و جریان پایانه T_1 با بکارگیری معادله (۱) بدست آورد (شکل (۱) را ببینید). با در نظر گرفتن شکل (۱) می‌توان اینگونه بیان نمود که:

اگر v_{B1N} و v_{B1T1} باهم مساوی باشند، *آنگاه* در بخش‌های S_1 و S_2 خطا رخ نداده است. در این شرایط ولتاژ بدست آمده برای گره B_1 صحیح است و این ولتاژ برای محاسبه‌ی ولتاژ گره بعدی بکار گرفته می شود.

جریان وارد شده به گره B_1 از بخش S_1 (i_{B1N}) (همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است) در حوزه‌ی زمان بصورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\begin{aligned} & i_{B1N}(t) = \\ & ((Z_c + R_{S1}/4).[v_N(t+\tau_{S1}) \\ & \quad -(Z_c + R_{S1}/4).i_N(t+\tau_{S1})] \\ & -(Z_c - R_{S1}/4)[v_N(t-\tau_{S1}) \\ & \quad +(Z_c - R_{S1}/4).i_N(t-\tau_{S1})] \\ & -\frac{R_{S1}}{4}.[2.v_N(t) - \frac{R_{S1}}{2}.i_N(t)])/2Z_c^2 \end{aligned} \quad (۲)$$

همچنین، با استفاده از رابطه (۲) جریان ورودی به گره B_1 از سمت S_2 محاسبه می‌شود. حال می‌توان جریان ورودی از گره B_1 به بخش S_3 (i_{B1}) را بصورت زیر بدست آورد:

$$i_{B1}(t) = i_{B1N}(t) + i_{B1T1}(t) \quad (۳)$$

همچنین، می‌توان ولتاژ گره B_2 را با بکارگیری ولتاژ گره B_1 (v_{B1N}) و جریان خروجی از آن (i_{B1})، و با استفاده از رابطه (۱) بدست آورد (v_{B2B1}). به همین صورت، ولتاژ گره B_2 با استفاده از ولتاژ و جریان پایانه T_2 نیز قابل محاسبه است (v_{B2T2}). حال، با مقایسه‌ی v_{B2B1} و v_{B2T2} می‌توان فهمید که آیا خطا در بخش‌های S_3 یا S_4 رخ داده است یا خیر.

این روش ادامه می‌یابد تا دو ولتاژ محاسبه شده برای گره B_i با یکدیگر مساوی نباشد. در این شرایط می‌توان گفت که خطا یا در بخش S_{2i-1} یا در بخش S_{2i} رخ داده است. اگر دو ولتاژ بدست آمده با یکدیگر برابر باشد تا $i=M-2$ گردد در این صورت خطا قطعاً در بخش S_{2M} اتفاق افتاده است.

حال، دو بخشی که در یکی از آنها خطا رخ داده است مشخص گردید. برای تعیین بخشی که قطعاً در آن خطا اتفاق افتاده است، از روش مقایسه‌ای دیگری برای ولتاژها استفاده می‌کنیم. ابتدا، بایستی ولتاژ صحیح گره B_i را با استفاده از ولتاژ و جریان پایانه‌های T_{i+1}، T_{i+2}، ...، T_{M-1} و P و با بکارگیری روشی مشابه با روشی که قبلا برای بدست آوردن ولتاژ هر کدام از گره‌ها (مثلا ولتاژ گره B_2 (v_{B2B1})) استفاده شد محاسبه نمود. نکته اینکه، بدلیل عدم وقوع خطا بین گره B_i و پایانه‌های T_{i+1}، T_{i+2}، ...، T_{M-1} و P، ولتاژ بدست آمده برای گره B_i ($v_{Bi\text{-}True}$) صحیح می‌باشد. *اگر* ولتاژ گره B_i بدست آمده با استفاده از اطلاعات گره B_{i-1} ($v_{BiB(i-1)}$) با ولتاژ صحیح گره B_i ($v_{Bi\text{-}True}$) برابر نباشد آنگاه خطا در بخش S_{2i-1} رخ داده است وگرنه اگر ولتاژ محاسبه شده برای گره B_i با بکارگیری اطلاعات گره T_i (v_{BiTi}) با ولتاژ $v_{Bi\text{-}True}$ برابر نباشند آنگاه خطا در بخش S_{2i} رخ داده است.

حال، بخش خطادار از خط مشخص گردید. در ادامه (مرحله دوم) به مکان‌یابی خطا پرداخته شده است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.8.3]

۲-۱-۲- مرحله دوم: روش مکان‌یابی خطا

در این مرحله، یک روش مکان‌یابی دو پایانه‌ای با لحاظ نمودن مدل گسترده‌ی خط انتقال برای مکان‌یابی خطا مورد استفاده قرار گرفته است. با این هدف، ولتاژ و جریان دو طرف بخش خطادار بایستی مشخص باشد. نکته اینکه، تمامی ولتاژها و جریان‌های گره‌ها بجز جریان خروجی از گره B_i به سمت خطا (i_{Bi}) قبلاً در مرحله اول محاسبه شده است. جریان‌های ورودی به گره B_i با استفاده از ولتاژ و جریان انتهای بخش‌های متناظر بدست می‌آید و جریان i_{Bi} با جمع دو جریان ورودی به گره B_i محاسبه می‌شود.

به عنوان مثال، فرض کنید خطا دربخش S_{2i-1} رخ داده باشد. جریان ورودی به گره B_i از بخش S_{2i} (i_{BiTi}) با استفاده از ولتاژ و جریان پایانه T_i (با بکارگیری رابطه (۲)) محاسبه می‌شود. همچنین، جریان ورودی به B_i از بخش S_{2i+1} (i_{BiBi+1}) و با بکارگیری رابطه‌ی (۲) بدست می‌آید. حال، می‌توان جریان خروجی از گره B_i (i_{Bi}) به سمت خطا را بصورت زیر محاسبه نمود:

$$i_{Bi}(t)= i_{BiTi}(t)+ i_{BiBi+1}(t) \qquad (۴)$$

اکنون، بخش خطادار S_{2i-1} را در نظر بگیرید. ولتاژ و جریان دو انتهای آن مشخص شد. ولتاژ محل خطا را می‌توان با استفاده از ولتاژ گره B_i و جریان خروجی از گره B_i بصورت ذیل محاسبه نمود:

$$\begin{aligned} &v_{FBi}(t) = \\ &((Z_c + R_{BiF}/4)^2.[v_{Bi}(t+\tau_{BiF}) - \\ &\qquad (Z_c + R_{BiF}/4).i_{Bi}(t+\tau_{BiF})] \\ &+ (Z_c - R_{BiF}/4)^2.[v_{Bi}(t-\tau_{BiF}) + \\ &\qquad (Z_c - R_{BiF}/4).i_{Bi}(t-\tau_{BiF})] \\ &- \frac{(Z_c + R_{BiF}/4)}{4}.[\frac{R_{BiF}/2}{(Z_c + R_{BiF}/4)}.v_{Bi}(t) \\ &\qquad + 2.(Z_c - R_{BiF}/4).i_{Bi}(t)])/2Z_c^{\,2} \end{aligned} \qquad (۵)$$

که:

v_{Bi} و i_{Bi} : به ترتیب ولتاژ B_i و جریان خروجی از گره B_i،

v_{FBi}: ولتاژ محاسبه شده برای نقطه F با استفاده از ولتاژ B_i و جریان خروجی از B_i،

τ_{BiF} : زمان لازم برای عبور موج سیار از B_i تا F،

R_{BiF}: مقاومت خط از B_i تا F.

همچنین، ولتاژ نقطه‌ی F با بکارگیری ولتاژ گره B_{i-1} و جریان خروجی از گره B_{i-1} قابل محاسبه است:

$$\begin{aligned} &v_{FBi-1}(t) = \\ &((Z_c + R_{Bi-1F}/4)^2.[v_{Bi-1}(t+T-\tau_{BiF}) - \\ &\qquad (Z_c + R_{Bi-1F}/4).i_{Bi-1}(t+T-\tau_{BiF})] \\ &+ (Z_c - R_{Bi-1F}/4)^2.[v_{Bi-1}(t-T+\tau_{BiF}) + \\ &\qquad (Z_c - R_{Bi-1F}/4).i_{Bi-1}(t-T+\tau_{BiF})] \\ &- \frac{(Z_c + R_{Bi-1F}/4).R_{Bi-1F}}{4}.[\frac{R_{Bi-1F}/2}{(Z_c + R_{Bi-1F}/4)}.v_{Bi-1}(t) \\ &\qquad + 2.(Z_c - R_{Bi-1F}/4).i_{Bi-1}(t)])/2Z_c^{\,2} \end{aligned} \qquad (۶)$$

که:

v_{Bi-1}: ولتاژ گره B_{i-1}،

i_{Bi-1}: جریان خروجی از گره B_{i-1}،

v_{FBi-1}: ولتاژ محاسبه برای نقطه F با استفاده از ولتاژ گره B_{i-1} و جریان خروجی از B_{i-1}،

T: زمان لازم برای عبور موج سیار از گره B_i تا گره B_{i-1}،

R_{Bi-1F}: مقاومت خط از B_{i-1} تا F.

فرض کنید که خطا باعث قطعی در خط انتقال نشده است. لذا، v_{FBi} و v_{FBi-1} با یکدیگر برابرند:

$$v_{FBi}(t)= v_{FBi-1}(t) \qquad (۷)$$

بنابراین، با مساوی قرار دادن (۵) و (۶)، معادله زیر بدست می‌آید:

$$f(v_{Bi}, i_{Bi}, v_{Bi-1}, i_{Bi-1}, t, \tau_{BiF}, Z_c, T, R_{BiF}, R_{Bi-1F}) = 0 \qquad (۸)$$

نمونه‌های ثبت شده در پنجره اطلاعاتی بایستی معادله (۸) را ارضا کند. لذا (۸) گسسته سازی می‌شود:

$$f(v_{Bi}, i_{Bi}, v_{Bi-1}, i_{Bi-1}, k, n, Z_c, T, R_{BiF}, R_{Bi-1F}) = 0 \qquad (۹)$$

که:

$t=k.\Delta t$،

$n.\Delta t = \tau_{BiF}$

Δt: فاصله زمانی نمونه برداری،

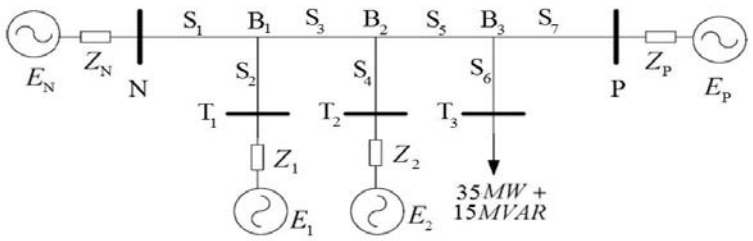
k ,n: اعداد دلخواه.

برای K نمونه ثبت شده حین خطا، K معادله و یک متغیر مجهول n وجود دارد که متناسب با مکان خطا می باشد. برای تعیین مکان خطا (x)، بایستی تابع بهینه سازی زیر را حل نمود:

$$\begin{aligned} &\mathrm{Min}\ J(n) = \\ &\underset{n}{\mathrm{Min}} \sum_{k=1}^{K} \left| f(v_{Bi}, i_{Bi}, v_{Bi-1}, i_{Bi-1}, k, n, Z_c, T, R_{BiF}, R_{Bi-1F}) \right| \end{aligned} \qquad (۱۰)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.8.3]



شکل (۲): خط انتقال دارای پنج پایانه

تابع (۱۰) با استفاده از روش‌های بهینه سازی موجود از جمله الگوریتم ژنتیک قابل حل است.

تا اینجا روش ارائه شده برای خطوط انتقال چند پایانه‌ای تک فاز شرح داده شد. نکته اینکه، روش ارائه شده برای خطوط انتقال چندپایانه‌ایِ سه فاز نیز قابل استفاده می‌باشد که در ادامه توضیح داده شده است.

۲-۲- خط انتقال چند پایانه‌ای سه فاز

خط انتقالی چند پایانه‌ای و سه فاز که دیاگرام تک خطی آن شبیه شکل (۱) می‌باشد را در نظر بگیرید. فرض کنید خطایی در بخش S_{2i-1} رخ داده است. برای خطوط انتقال سه فاز، ابتدا بایستی معادلات دیفرانسیل جزئی که در حوزه فاز نوشته شده است به حوزه مودال تبدیل شود [۲۵]. به ازای هر کدام از سه مود می‌توان ۱۰ معادله به شکل معادلات (۱) تا (۱۰) نوشت. بدلیل اینکه اولین مود در انواع خطاها موجود است، می‌توان آنرا برای تعیین مکان خطا بکار برد. بنابراین، تابع بهینه سازی زیر مشابه (۱۰) برای اولین مود به‌دست می آید:

$$\mathrm{Min}\ J(n^{(1)}) = \underset{n^{(1)}}{\mathrm{Min}} \sum_{k=1}^{K} \left| f(v_{Bi}^{(1)}, i_{Bi}^{(1)}, v_{Bi-1}^{(1)}, i_{Bi-1}^{(1)}, k, n^{(1)}, Z_c^{(1)}, T^{(1)}, R_{BiF}^{(1)}, R_{Bi-1F}^{(1)}) \right| \quad (11)$$

در تابع (۱۱) پارامترهای با بالانویس (۱) مربوط به اولین مود می باشند. با حل تابع (۱۱) با بکارگیری الگوریتم ژنتیک، $n^{(1)}$ که متناسب با مکان خطا می باشد محاسبه می شود. الگوریتم ژنتیک، روشی مبتنی بر تئوری تکامل است و بر اساس مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها که یک جمعیت را تشکیل می‌دهند کار می‌کند. جمعیت اولیه با استفاده از یک رویکرد تصادفی تولید می‌شود. برای همه‌ی کروموزوم های نسل اول، مقدار برازش با توجه به تابع برازش تعیین می‌شود. با بکارگیری مجموعه‌ای از عملگرهای ژنتیکی که به جمعیت مورد نظر اعمال می‌شود، جمعیت جدیدی با همان تعداد کروموزوم تشکیل می‌شود. در این الگوریتم عملگرهای انتخاب، برش و جهش کاربرد عمده‌ای دارند. در روش‌های انتخاب، افرادی که دارای تابع برازندگی بهتری هستند ترجیح داده می‌شوند. این روش ادامه می یابد تا در یکی از نسل‌ها، الگوریتم همگرا شده و یا تعداد تکرار به حد معینی برسد.

۳- ارزیابی روش پیشنهادی

یک سیستم قدرت ۵۰۰KV و ۶۰HZ که دارای ۵ پایانه می‌باشد (همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است) برای ارزیابی روش ارائه شده در نرم‌افزار MATLAB مدل سازی شده است. این سیستم نمونه‌ی شبیه‌سازی شده را می‌توان برای اثبات صحت عملکرد روش مکان‌یابی پیشنهادی بکار برد. پارامترهای مربوط به سیستم شبیه‌سازی شده در جدول (۱) آورده شده است. مطالعات شبیه‌سازی با در نظر گرفتن شرایط مختلف سیستم و خطا انجام گرفته است. خطای مکان‌یابی به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

درصد خطای مکان یابی =
(۱۲) ۱۰۰× [طول بخش خطا دیده/(فاصله واقعی خطا – فاصله محاسبه شده)]

بخش خطادار با بهره‌گیری از مرحله‌ی اول از روش ارائه شده تعیین می‌گردد. همانگونه که در بخش ۲-۲- توضیح داده شد، پس از تعیین ولتاژ و جریان همه‌ی گره‌ها، تابع بهینه‌سازی (۱۱) برای یافتن محل خطا مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. برای حل تابع (۱۱) از Global Optimization Toolbox ™ در نرم‌افزار MATLAB برای اجرای الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. شبیه‌سازی‌های زیادی برای بررسی اعتبار روش پیشنهادی انجام شده که در ذیل به برخی از آنها پرداخته شده است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.8.3]

برای مطالعه تاثیر محل خطا بر روش مکان‌یابی پیشنهادی، جدول (۲) نتایج شبیه‌سازی برای خطاهای اعمال شده به قسمت N-P مربوط به خط را نشان می‌دهد. انواع مختلف خطا با مقاومت خطای ۱۰Ω و زاویه‌ی شروع خطای ۹۰° در فواصل مختلف از پایانه P اعمال شده و اطلاعات ولتاژ و جریان سه فاز ثبت شده در پایانه‌ها برای مکان‌یاب خطا ارسال شده است. این اطلاعات به عنوان ورودی به برنامه پیشنهادی داده شده و درصد خطای مکان‌یابی در جدول (۲) مشخص شده است. همچنین، این خطاها به بخش‌های S2، S4 و S6 نیز اعمال شده و نتایج مکان‌یابی خطا در جدول (۳) نمایش داده شده است. با بررسی جداول (۲) و (۳) می‌توان مشاهده نمود که بخش خطادار از خط به درستی توسط روش پیشنهادی تعیین شده و همچنین روش ارائه شده با تغییر مکان خطا دارای دقت بالایی بوده و وابستگی پایینی به تغییر مکان خطا دارد. به طوری که حداکثر قدرمطلق خطا کمتر از ۰/۰۵ درصد می‌باشد.

جدول (۱): پارامترهای خط انتقال شبیه سازی شده

بخش	طول	پارامترهای توالی مثبت و منفی	پارامترهای توالی صفر
S_1	130	R_1=0.0275(Ω/km) L_1=1.002768(mH/km) C_1=13(nF/km)	R_0=0.275(Ω/km) L_0=3.4505998(mH/km) C_0=8.5(nF/km)
S_2	120		
S_3	80		
S_4	100		
S_5	110		
S_6	50		
S_7	70		

جدول (۲): نتایج حاصل از تخمین محل خطا در فواصل مختلف خطا روی بخش N-P

نوع خطا	فاصله واقعی خطا از پایانه P (Km)	تعیین بخش خطا دیده	خطای فاصله‌یابی به درصد
3LG	40	✔	-0.0405
	100	✔	-0.0061
	160	✔	-0.0336
	250	✔	0.0096
	300	✔	0
	350	✔	-0.0227
SLG	40	✔	-0.0205
	100	✔	-0.0484
	160	✔	0.0287
	250	✔	0.0096
	300	✔	0
	350	✔	-0.0227
DLG	40	✔	-0.0405
	100	✔	-0.0061
	160	✔	0.0287
	250	✔	0.0096
	300	✔	0
	350	✔	-0.0227
LL	40	✔	-0.0405
	100	✔	-0.0484
	160	✔	0.0287
	250	✔	0.0096
	300	✔	0
	350	✔	-0.0227

برای بررسی تاثیر مقاومت خطا بر روش ارائه شده، مکان‌های مختلف روی خط چند پایانه‌ای در نظر گرفته شده و خطاهایی با مقاومتهای ۱Ω، ۱۰Ω و ۱۰۰Ω و زاویه شروع خطای ۴۵° در این مکان‌ها به سیستم انتقال اعمال شده و نتایج اجرای روش پیشنهادی برای بخش N-P در جدول (۴) مشاهده می‌شود. در این جدول نیز حداکثر قدرمطلق خطا مقداری ناچیز بوده و به مقدار ۰/۰۴ درصد محدود می‌گردد. نتیجه اینکه، روش ارائه شده به مقاومت خطا حساسیت پایینی از خود نشان داده و دقت آن با تغییر مقاومت خطا تغییرات بسیار کمی را از خود نشان داده است.

زاویه‌ی شروع خطا یکی از عواملی است که دقت روش‌های سنتی را تحت تاثیر قرار می دهد. برای نشان دادن تاثیر زاویه‌ی شروع خطا بر روش پیشنهادی در این مقاله، خطاهای گوناگون با زوایای شروع خطای مختلف و در مکان‌های مختلف شبیه سازی شده و نتایج بدست آمده از اجرای روش ارائه شده به ازای خطای تک فاز به زمین با زوایای شروع خطای ۰°، ۳۵°، ۷۵° و ۱۰۰° با مقاومت خطای ۱۰Ω در جدول (۵) آورده شده است. از نتایج بدست آمده می توان چنین نتیجه گرفت که برخلاف روش های سنتی زاویه‌ی شروع خطا تاثیر کمی بر روش پیشنهادی دارد.

بررسی جداول (۲) تا (۵) و نتایج حاصل از اجرای روش پیشنهادی در حالت‌های گوناگون نشان می‌دهد که حداکثر قدر مطلق خطا در همه‌ی حالت‌های مورد مطالعه کمتر از ۰/۰۵ درصد بوده است. برای مقایسه‌ی روش پیشنهادی با روش‌های قبلی [۲۳-۱۴]، شبکه موجود در مرجع [۲۳] (که بالاترین دقت را در بین مراجع قبلی

جدول (۳): نتایج تخمین محل خطا در فواصل متفاوت خطا روی بخش‌های S2، S4 و S6

نوع خطا	فاصله واقعی خطا از پایانه T_i (Km)		تعیین بخش خطا دیده	خطای فاصله‌یابی به درصد
3LG	فاصله از T_1	50	✔	-0.0487
		100	✔	-0.0266
	فاصله از T_2	40	✔	0.0455
		70	✔	0
	فاصله از T_3	20	✔	-0.0105
SLG	فاصله از T_1	50	✔	-0.0487
		100	✔	-0.0266
	فاصله از T_2	40	✔	0.0455
		70	✔	0
	فاصله از T_3	20	✔	-0.0105
DLG	فاصله از T_1	50	✔	-0.0487
		100	✔	-0.0266
	فاصله از T_2	40	✔	0.0455
		70	✔	0
	فاصله از T_3	20	✔	-0.0105
LL	فاصله از T_1	50	✔	-0.0487
		100	✔	-0.0266
	فاصله از T_2	40	✔	0.0455
		70	✔	0
	فاصله از T_3	20	✔	-0.0105

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.8.3]

گزارش کرده) انتخاب شده و برای شبیه‌سازی بکـار بـرده شـده اسـت. پس از اجرای روش پیشنهادی به ازای شرایط مختلف خطای اعمالی به این شبکه، دقت بالای روش پیشنهادی مجدداً مورد تایید قرار گرفت و حداکثر قدرمطلق خطـا در حالت‌هـای مختلـف کمتـر از ۰/۰۴ درصـد بدست آمد، در حالی که در [۲۳] در بهترین حالت، حداکثر قـدرمطلق خطا ۰/۱ درصد گزارش شده و این موضوع اثبـات کننـده دقـت بـالاتر

جدول (۴): نتایج حاصل از تخمین محل خطا با مقاومتهای مختلف خطا روی بخش N-P

نوع خطا	فاصله واقعی خطا از پایانه P (Km)	مقاومت خطا (اهم)	تعیین بخش خطا دیده	خطای فاصله‌یابی به درصد
3LG	180	1	✔	0.0233
		10	✔	0.0355
		100	✔	-0.0390
	330	1	✔	0.02
		10	✔	-0.0311
		100	✔	-0.0391
SLG	180	1	✔	0.0233
		10	✔	0.0355
		100	✔	-0.0390
	330	1	✔	0.02
		10	✔	-0.0311
		100	✔	-0.0391
DLG	180	1	✔	0.0233
		10	✔	0.0355
		100	✔	-0.0390
	330	1	✔	0.02
		10	✔	-0.0311
		100	✔	-0.0391
LL	180	1	✔	0.0233
		10	✔	0.0355
		100	✔	-0.0390
	330	1	✔	0.02
		10	✔	-0.0311
		100	✔	-0.0391

روش پیشنهادی نسـبت بـه روش‌هـای قبلـی خصوصـاً بـرای خطـوط طولانی است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش دقیقی برای مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال چنـد پایانه‌ای بر اساس الگوریتم ژنتیک ارائـه شـده کـه از اطلاعـات ولتـاژ و جریان همزمان پایانه‌ها استفاده می‌نماید. این روش از دو مرحلـه بـرای مکان یابی خطا بهره می برد. در مرحله اول، بخش خطادار تعیین شده و در مرحله دوم، الگوریتم مکان یـابی اجـرا مـی شـود. در مقایسـه بـا روش‌های قبلی، روش پیشنهادی دارای دقت بالاتری است و این بدلیل استفاده از مدل گسترده خط انتقال در حوزه زمان در روش پیشنهادی می‌باشد، بطوری‌که حداکثر قدر مطلق خطا با اجرای روش ارائه شده به ۰/۰۵ درصد محدود می‌گردد.

جدول (۵): نتایج تخمین محل خطا با زوایای شروع °۰، °۳۵، °۷۵ و °۱۰۰ با مقاومت خطای ۱۰Ω در فواصل متفاوت خطا

زاویه شروع خطا	فاصله واقعی خطا (Km)		تعیین بخش خطا دیده	خطای فاصله‌یابی به درصد
°۰	فاصله از N	65	✔	0.0125
	فاصله از T_1	45	✔	-0.037
	فاصله از T_2	55	✔	0.0279
	فاصله از T_3	30	✔	0.0347
	فاصله از P	45	✔	0.0143
°۳۵	فاصله از N	65	✔	0.02
	فاصله از T_1	45	✔	0.019
	فاصله از T_2	55	✔	0
	فاصله از T_3	30	✔	0.012
	فاصله از P	45	✔	-0.026
°۷۵	فاصله از N	65	✔	0.016
	فاصله از T_1	45	✔	-0.037
	فاصله از T_2	55	✔	-0.017
	فاصله از T_3	30	✔	-0.036
	فاصله از P	45	✔	-0.03
°۱۰۰	فاصله از N	65	✔	0.025
	فاصله از T_1	45	✔	0.015
	فاصله از T_2	55	✔	-0.015
	فاصله از T_3	30	✔	0.036
	فاصله از P	45	✔	-0.04

مراجع

[۱] حسین عسکریان ابیانه، هدا شریفیان، رضا محمدی چبنلو، فرزاد رضوی، **"روشی نو در بدست آوردن کمترین نقاط شکست به کمک الگوریتم ژنتیک"**، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال هشتم، شماره دوم، پائیز و زمستان ۱۳۹۰.

[۲] حسان واحدی ، رضا نوروزیان ، ابوالفضل جلیلوند ، گئورگ قره پتیان، **"ارائه روشی نوین برای بهره برداری و تشخیص حالت جزیره‌ای تولیدات پراکنده مبتنی بر اینورتر"**، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۸، شماره ۲، ۱۳۹۰.

[۳] محسن حمزه، شاهرخ فرهنگی، مجید صنایع‌پسند، **"روشی جدید در تحلیل عملکرد حفاظت‌های ضدجزیره‌ای فرکانسی در حالت جزیره‌ای چند اینورتری"**، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال نهم، شماره دوم، صص ۱۸-۱۱، پائیز و زمستان ۱۳۹۱.

[۴] رحمن دشتی، جواد ساده، **"ارائه روشی اجرایی و نوین جهت شناسایی بخش خطا در شبکه های توزیع"**، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۱۰، شماره ۱، ۱۳۹۲.

[5] Takagi, K., Yomakoshi, Y., Yamaura, M., Kondow, R., Matsushima, T., "Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-101, no. 8, pp. 2892–2898, Aug. 1982.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.8.3]

[6] Eriksson, L., Saha, M. M., Rockefeller, G. D., "An accurate fault locator with compensation for apparent reactance in the fault resistance resulting from remote-end indeed", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-104, no. 2, pp. 424–436, Feb. 1985.
[7] Xin Zhou, D., Shen Xing, S., "Optimizing solution of fault location using single terminal quantities", Sci. China Ser. E-Tech Sci., vol. 51, no. 6, pp. 761–772, Jun. 2008.
[8] Izykowski, J., Rosolowski, E., Saha, M. M., "Locating faults in parallel transmission lines under availability of complete measurements at one end", Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm. Distrib., vol. 151, no. 2, pp. 268–273, Mar. 2, 2004.
[9] Novosel, D., Hart, D. G., Udren, E., Garitty, J., "Unsynchronized two-terminal fault location estimation", IEEE Trans. Power Del., vol. 11, no. 1, pp. 130–138, Jan. 1996.
[10] Gopalakrishnan, A., Kezunovic, M., McKenna, S.M., Hamai, D.M., "Fault location using distributed parameter transmission line model", IEEE Trans. Power Del., vol. 15, no. 4, pp. 1169–1174, Oct. 2000.
[11] Jiang, J.-A., Yang, J.-Z., Lin, Y.-H., Liu, C.-W., Ma, J.-C., "An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines-part I: Theory and algorithms", IEEE Trans. Power Del., vol. 15, no. 2, pp. 486–493, Apr. 2000.
[12] Silveira, E. G., Pereira, C., "Transmission line fault location using two-terminal data without time synchronization", IEEE Trans. Power Del., vol. 22, no. 1, pp. 498–499, Jan. 2007.
[13] Ghazizadeh-Ahsaee, M., "Accurate NHIF locator utilizing two-end unsynchronized measurements", IEEE Trans. Power Del., vol. 28, no. 1, pp. 419-426, Jan. 2013.
[14] Abe, M., Otsuzuki, Emura, N. T., Takeuchi, M., "Development of a new fault location system for multi-terminal single transmission lines", IEEE Trans. Power Del., vol. 10, no. 1, pp. 159–168, Jan. 1995.
[15] Nagasawa, T., Abe, M., Otsuzuki, N., Emura, T., Jikihara, Y., Takeuchi, M., "Development of a new fault location algorithm for multiterminal two parallel transmission lines", IEEE Trans. Power Del., vol. 7, no. 3, pp. 1516–1532, Jul. 1992.
[16] Funabashi, T., Otoguro, H., Mizuma, Y., Dube, L., Ametani, A., "Digital fault location algorithm for parallel double-circuit multi-terminal transmission lines", IEEE Trans. Power Del., vol. 15, no. 2, pp. 531–537, Apr. 2000.
[17] Sanderson, J. V. H., Santana, R. G. R., Al-Fakri, B., "Improved directional comparison based algorithm for protection of multi-terminal transmission lines", in Proc. 5th Int. Conf. Develop. Power Syst. Protect., 1993, vol. 368, pp. 153–156.
[18] Liu, C.-W., Lien, K.-P., Chen, C.-S., Jiang, J.-A., "A universal fault location technique for N-terminal (N≥3) transmission lines", IEEE Trans. Power Del., vol. 23, no. 3, pp. 1366–1373, Jul. 2008.
[19] Ngu, E.E., Ramar, K. "A combined impedance and traveling wave based fault location method for multi-terminal transmission lines", Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 33, no. 10, pp. 1767–75, 2011.
[20] Yongli, Z., Xinqiao, F., "Fault location scheme for a multi-terminal transmission line based on current traveling waves", Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 53, pp. 367–374, 2013.
[21] Brahma, S. M., "Fault location scheme for a multi-terminal transmission line using synchronized voltage measurements", IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 2, pp. 1325–1331, Apr. 2005.
[22] Brahma, S. M., "New fault-location method for a single multiterminal transmission line using synchronized phasor measurements", IEEE Trans. Power Del., vol. 21, no. 3, pp. 1148–1153, Jul. 2006.
[23] Jiang, Q., Wang, B., Li, X., "An Efficient PMU-based fault-location technique for multiterminal transmission lines", IEEE Trans. Power Del., vol. 29, no. 4, Aug. 2014.
[24] Sadeh, J., Hadjsaid, N. A., Ranjbar, M., Feuillet, R., "Accurate fault location for series compensated transmission lines", IEEE Trans. Power Del., vol. 15, no. 3, pp. 1027–1033, Jul. 2000.
[25] Ibe, A. O., Cory, B. J., "A travelling wave-based fault locator for two and three terminal networks", IEEE Trans. Power Del., vol. 1, no. 2, pp. 283–288, Apr. 1986.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.8.3]